

VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Ostrava, 2015

Autor: Tomáš Klein

VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY
KATEDRA ELEKTRONIKY

**Vliv převodovky na dynamiku elektrického pohonu
s DC motorem**

**Influence of the gearbox on the Dynamics of
Electric Drive with DC Motor**

Ostrava, 2015

Autor: Tomáš Klein

Zadání bakalářské práce

Student:

Tomáš Klein

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

2612R003 Aplikovaná elektronika

Téma:

Vliv převodovky na dynamiku elektrického pohonu s DC motorem
Influence of the Gearbox on the Dynamics of Electric Drive with DC Motor

Zásady pro vypracování:

1. Popište možnosti regulace rychlosti a momentu u DC pohonů
2. Pro zadané parametry pohonu stanovte optimální převod při různých hodnotách veličin
3. Stanovte časové průběhy důležitých veličin pro konkrétní zadané situace pohonu

Seznam doporučené odborné literatury:

NEBORÁK, I.: Mechatronické systémy pro kombinované a distanční studium, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2013

NEBORÁK, I.: Modelování a simulace elektrických regulovaných pohonů. Monografie, VŠB-TU Ostrava 2002, 172 stran, ISBN 80-248-0083-7.

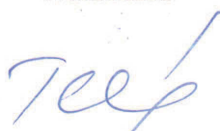
ČERNÝ, M.: Elektrické pohony 1.díl., SNTL Praha 1976

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Ivo Neborák, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015



doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry

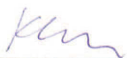


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Ostravě dne 15.04.2015



podpis

Poděkování

Rád bych touto cestou vyjádřil poděkování panu doc. Ing. Ivo Neborákovi, CSc. za jeho cenné rady a trpělivost při vedení mé bakalářské práce.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem regulátoru proudu DC motoru, regulátoru rychlosti zdvihu (spouštění) pracovního mechanismu a výpočtem optimálního převodu mechanické převodovky. Cílem bakalářské práce je stanovení časových průběhů rychlosti pracovního mechanismu pomocí simulačního prostředí Matlab - Simulink.

Klíčová slova

DC motor, DC pohon, pracovní mechanismus, Simulink, regulovaný pohon, převodovka

Abstract

The main aim of this thesis is designing the regulation of DC motor's current, lift speed regulation, design of work mechanism and a calculation of the optimal gear for mechanical transmission. Furthermore, time course assessment of work mechanism speed using simulation environment MATLAB - Simulink.

Key Words

DC motor, DC drive, work mechanism, Simulink, controlled drive, gearbox

Seznam použitých symbolů

| | | |
|----------------|--|----------------------|
| a_{pm} | zrychlení pracovního mechanismu | $[m/s^2]$ |
| c | konstrukční konstanta motoru | $[-]$ |
| F_{mot} | přenos motoru | $[-]$ |
| F_{om} | přenos optimálního modulu | $[-]$ |
| F_{os} | přenos otevřené smyčky | $[-]$ |
| F_R | přenos regulátoru | $[-]$ |
| F_{so} | přenos symetrického optima | $[-]$ |
| F_t | tření ve vodítkách vozíku | $[N]$ |
| g | tíhové zrychlení | $[m/s^2]$ |
| i | převodový poměr | $[-]$ |
| I_a | proud kotvy | $[A]$ |
| I_b | proud budicího obvodu | $[A]$ |
| J_c | celkový moment setrvačnosti | $[kg \cdot m^2]$ |
| J_{pm} | moment setrvačnosti pracovního mechanismu | $[kg \cdot m^2]$ |
| $J_{pm_{red}}$ | redukovaný moment setrvačnosti pracovního mechanismu | $[kg \cdot m^2]$ |
| K_i | zesílení čidla proudu | $[-]$ |
| K_{pm} | zesílení pulzního měniče | $[-]$ |
| K_R | zesílení regulátoru | $[-]$ |
| K_{td} | zesílení tachodynamu | $[-]$ |
| L_a | indukčnost vinutí kotvy | $[H]$ |
| L_b | indukčnost vinutí buzení | $[H]$ |
| M_m | elektromagnetický moment motoru | $[Nm]$ |
| M_{pm} | moment pracovního mechanismu | $[Nm]$ |
| $M_{pm_{red}}$ | moment pracovního mechanismu | $[Nm]$ |
| M_t | třecí moment při 1% přepětí řemenu | $[Nm]$ |
| m_v | hmotnost vozíku | $[kg]$ |
| m_z | nosnost vozíku | $[kg]$ |
| PM | pracovní mechanismu | $[-]$ |
| R_a | kotevní odpor motoru | $[\Omega]$ |
| R_b | budicí odpor motoru | $[\Omega]$ |
| r_k | poloměr převáděcí kladky | $[m]$ |
| t | čas | $[s]$ |
| t_{pm} | doba náběhu pracovního mechanismu | $[s]$ |
| t_m | rychlost regulace | $[s]$ |
| t_r | dobrá regulace | $[s]$ |
| U_a | napájecí napětí kotvy | $[V]$ |
| U_b | napájecí napětí budicího obvodu | $[V]$ |
| U_i | indukované napětí | $[V]$ |
| ϕ | magnetický tok | $[Wb]$ |
| ω_m | úhlová rychlost motoru | $[rad \cdot s^{-1}]$ |
| τ | časová konstanta | $[ms]$ |
| σ | překmit | $[\%]$ |

Obsah

Seznam obrázků

Seznam tabulek

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Úvod | 1 |
| 2 | Struktura DC pohonu s pulzním měničem | 2 |
| 2.1 | Stejnoseměrný motor | 2 |
| 2.2 | Náhradní schéma DC motoru | 4 |
| 2.3 | Matematický model pulzního měniče | 6 |
| 2.4 | Regulace pohonu | 7 |
| 2.5 | Metody standardních přenosů: | 8 |
| 3 | Mechanika pohonu | 11 |
| 3.1 | Mechanické charakteristiky | 11 |
| 3.2 | Převody v elektrických pohonech | 12 |
| 3.3 | Přepočet parametrů na hřídel motoru | 12 |
| 3.4 | Vliv převodovky na mechanickou charakteristiku motoru | 14 |
| 4 | Sestavení simulačního modelu DC pohonu | 15 |
| 4.1 | Zadané parametry | 15 |
| 4.2 | Výpočet parametrů pracovního mechanismu | 16 |
| 4.3 | Regulace motoru s podřízenou smyčkou s konstantní zátěží | 18 |
| 5 | Výsledky simulace DC pohonu | 22 |
| 5.1 | Simulace pracovního mechanismu | 22 |
| 6 | Závěr | 30 |
| 7 | Seznam příloh | 32 |

Seznam obrázků

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | Složení DC motoru s permanentními magnety | 2 |
| 2.2 | Mechanická charakteristika DC motoru - řízení rychlosti změnou kotevního odporu | 3 |
| 2.3 | Mechanická charakteristika DC motoru - řízení rychlosti změnou napájecího napětí | 3 |
| 2.4 | Mechanická charakteristika DC motoru - řízení rychlosti změnou magnetického toku | 4 |
| 2.5 | Náhradní schéma DC motoru s cizím buzením | 4 |
| 2.6 | Blokové schéma stejnosměrného motoru | 5 |
| 2.7 | Zapojení jednovadrátového pulzního měniče | 6 |
| 2.8 | Průběh veličin při PWM řízení pro spojitý a nespojitý proud | 7 |
| 2.9 | Schéma uzavřené regulační smyčky | 7 |
| 2.10 | Ukazatel kvality regulace | 8 |
| 2.11 | Přenosová charakteristika metody OM | 9 |
| 2.12 | Přenosová charakteristika metody SO(1), vliv filtru(2) | 10 |
| 3.1 | Mechanická charakteristika | 11 |
| 3.2 | Reakční a potenciální moment pracovního mechanismu | 12 |
| 3.3 | Elektrický pohon s převodem | 12 |
| 3.4 | Optimální převod v závislosti na poměrném zatěžovacím momentu | 14 |
| 3.5 | Mechanické charakteristiky DC motoru před a za převodovkou | 14 |
| 4.1 | Mechanické soustrojí zdvižné plošiny | 16 |
| 4.2 | Blokové schéma mechanické části DC motoru a pracovního mechanismu | 18 |
| 4.3 | Blokové schéma soustavy regulátorů a DC motoru | 19 |
| 5.1 | Simulace převodových poměrů pro spouštění nezatíženého PM | 22 |
| 5.2 | Simulace převodových poměrů pro zdvih nezatíženého PM | 22 |
| 5.3 | Simulace převodových poměrů pro spouštění zatíženého PM | 23 |
| 5.4 | Simulace převodových poměrů pro zdvih zatíženého PM | 23 |
| 5.5 | Simulace průběhů otáček motoru s regulační strukturou/přímo napájený | 25 |
| 5.6 | Simulace průběhů proudu kotvou motoru s regulační strukturou/přímo napájený | 25 |
| 5.7 | Porovnání regulátorů proudu vypočítaných dle metody OM a SO | 26 |
| 5.8 | Porovnání průběhů rychlosti zdvihu PM pro různé výpočty regulátoru | 26 |
| 5.9 | Porovnání rychlosti spouštění PM pro různé převodové poměry | 28 |
| 5.10 | Porovnání rychlosti zdvihu PM pro zvolený převodový poměr | 28 |

Seznam tabulek

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Porovnání parametrů jednotlivých metod | 10 |
| 4.1 | Tabulka vypočtených parametrů pracovního mechanismu | 17 |
| 4.2 | Porovnání optimálních, zvolených a fixních převodových poměrů | 17 |
| 4.3 | Porovnání výsledků výpočtu regulátoru rychlosti | 20 |
| 4.4 | Celkové výsledky výpočtu regulace | 21 |
| 5.1 | Porovnání doby náběhu a zrychlení PM pro i_{opt} a $i = 20$ | 24 |
| 5.2 | Porovnání doby náběhu a zrychlení PM pro převodový poměr $i = 30$ | 24 |
| 5.3 | Tabulka porovnání odchylky rychlosti PM pro metodu OM | 27 |
| 5.4 | Tabulka porovnání zrychlení a doby náběhu PM pro regulátory počítané dle metody SO | 29 |

1. Úvod

Hlavním cílem bakalářské práce je určení vlivu převodovky na dynamiku regulovaného pohonu se stejnosměrným motorem. To zahrnuje výpočet parametrů pracovního mechanismu pro 4 režimy - zdvih (spouštění), zatížený (nezatížený). Dále stanovení optimálního převodového poměru a výpočet regulátoru rychlosti a proudu dle metody optimálního modulu a symetrického optima.

Druhá kapitola vysvětluje důležité prvky regulační struktury DC motoru. Obsahuje popis, možnosti regulace, náhradní schéma a vypočítaný matematický model stejnosměrného motoru. Popis pulzního měniče, parametry regulace obvodu a metody standardních přenosů.

Třetí kapitola vysvětluje mechanické charakteristiky pracovního mechanismu, seznámení s mechanickým převodem a jeho přepočtem na hřídel motoru. Dále obsahuje popis optimálního převodu a vliv převodovky na mechanickou charakteristiku motoru.

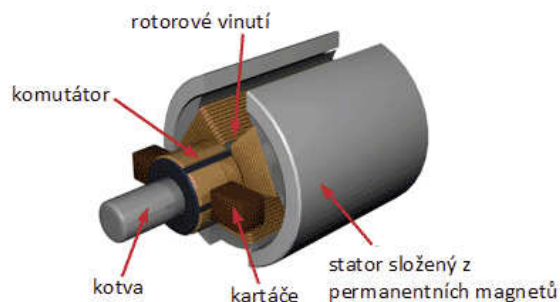
Čtvrtá kapitola obsahuje zadané parametry motoru, pracovního mechanismu a regulátoru. Najdeme zde výpočet parametrů pracovního mechanismu pro jednotlivé režimy, výpočet regulátorů rychlosti a proudu dle metod OM a SO.

Pátá kapitola obsahuje výsledky simulace převodových poměrů, regulátoru otáček a proudu. Dále obsahuje porovnání vypočítaných regulátorů a odchylky skutečné hodnoty od požadované.

2. Struktura DC pohonu s pulzním měničem

2.1 Stejnosměrný motor

Složení stejnosměrného motoru s permanentními magnety je vyznačeno na obr. 2.1.



Obrázek 2.1: Složení DC motoru s permanentními magnety[1]

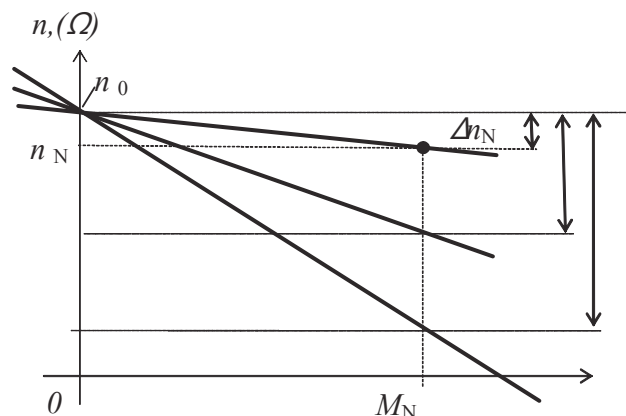
DC motor je točivý stroj, který je napájený stejnosměrným proudem. Motor je složen ze tří částí: [8]

- stator – pevná stojící část, složená z pevných permanentních magnetů, které vytvářejí statorové magnetické pole
- rotor(kotva) – točící se část, složená z vinutí cívek, do kterých je přiváděna elektrická energie, která vytváří rotorové magnetické pole
- přenosové ústrojí – nebo-li komutátor s lamelami ukončující cívky vinutí, který zajišťuje přivedení správně orientovaného proudu do cívek kotvy. Ke komutátoru jsou přitlačené elektrografitové kartáče, tzv. uhlíky.

Možnosti řízení otáček DC motoru [7]

- Změnou kotevního odporu R_a

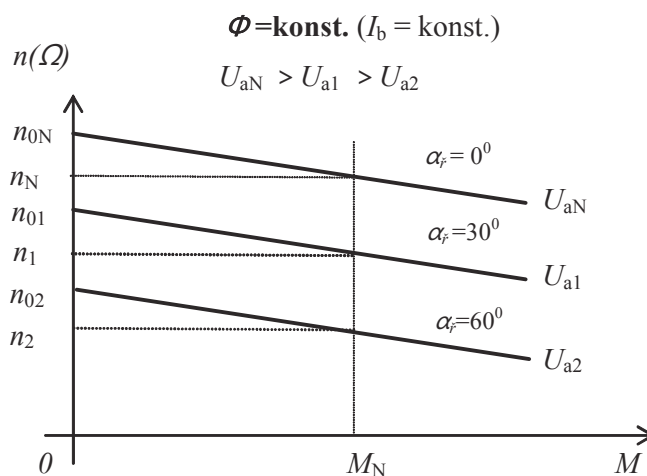
Kotevní odpor R_a , který je dán vinutím kotvy, lze zvýšit přiřazením vnějšího odporu R_p . Tento způsob řízení je neefektivní, neboť elektrická energie se přemění v teplo.



Obrázek 2.2: Mechanická charakteristika DC motoru - řízení rychlosti změnou kotevního odporu [3]

- **Změnou napájecího napětí U_a**

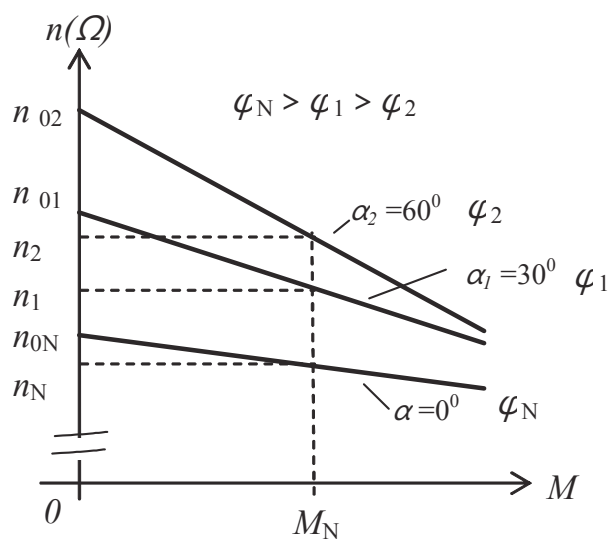
Nejpoužívanější regulace stejnosměrného motoru - plynulou změnou napájecího napětí U_a , dosáhneme plynulé změny otáček motoru v celém rozsahu. Změnou polarity můžeme měnit směr otáčení motoru.



Obrázek 2.3: Mechanická charakteristika DC motoru - řízení rychlosti změnou napájecího napětí [3]

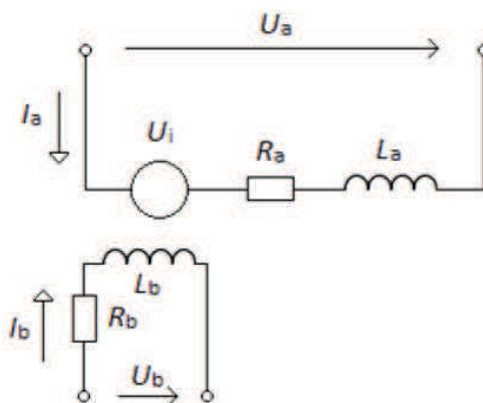
- **Změnou magnetického toku ϕ**

Tato možnost lze použít u motoru s cizím buzením. U motoru s permanentními magnety tato metoda použít nelze. Při změně magnetického toku, tedy odbuzování motoru, se mění výstupní charakteristika motoru.[7]



Obrázek 2.4: Mechanická charakteristika DC motoru - řízení rychlosti změnou magnetického toku [3]

2.2 Náhradní schéma DC motoru



Obrázek 2.5: Náhradní schéma DC motoru s cizím buzením [7]

Uvedené náhradní schéma platí, jak pro DC motor s cizím buzením, tak pro motor s permanentními magnety. Pro zapojení zobrazené na obr.2.5, platí tyto lineární rovnice:[7]

$$U_a = U_i + R_a \cdot I_a + L_a \cdot \frac{di_a}{dt} \quad (2.1)$$

$$M_m = c\phi \cdot i_a \quad (2.2)$$

$$U_b = R_b \cdot I_b \quad (2.3)$$

$$U_i = c\phi \cdot \omega_m \quad (2.4)$$

$$M_m - M_{pm} = J_c \frac{d\omega_m}{dt} \quad (2.5)$$

$$\tau_m = \frac{R_a \cdot J_c}{(c\Phi)^2} \quad (2.6)$$

Vytvoření matematického modelu motoru

Rovnice pro stejnosměrný motor upravíme pomocí Laplaceovy transformace a vytvoříme jednotlivé operátorové přenosy. Uvažujeme tyto zjednodušující předpoklady:[6]

- konstantní parametry (indukčnosti, odpory, $c\phi$)
- zanedbáváme reakce kotvy

$$U_a(p) = R_a \cdot I_a(p) \cdot \left(1 + \frac{L_a}{R_a}p\right) \quad (2.7)$$

$$\tau_a = \frac{L_a}{R_a} \quad (2.8)$$

$$U_a(p) = R_a \cdot I_a(p) \cdot (1 + \tau_a p) \quad (2.9)$$

$$F_a(p) = \frac{I_a(p)}{U_a(p)} = \frac{\frac{1}{R_a}}{(1 + \tau_a p)} \quad (2.10)$$

$$u_i(p) = c\phi \cdot \omega_m(p) \quad (2.11)$$

$$F_{c\phi}(p) = \frac{U_i(p)}{\omega_m(p)} = c\phi \quad (2.12)$$

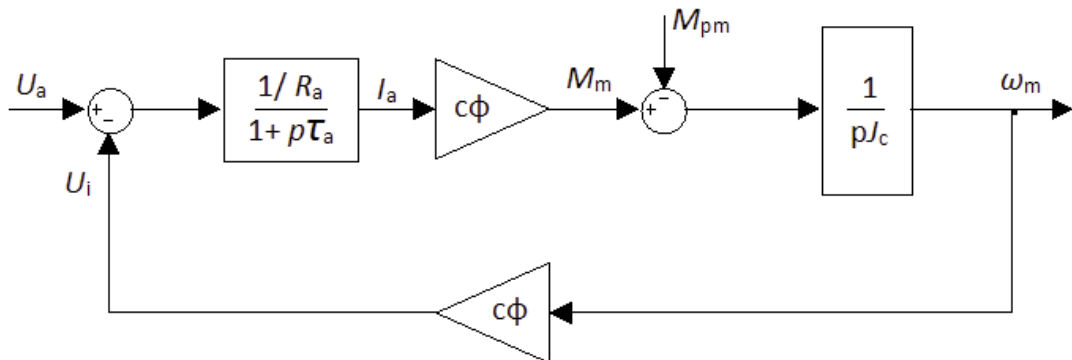
$$M_m(p) - M_{pm}(p) = J_c(p) \cdot \omega_m(p) \quad (2.13)$$

$$F_m(p) = \frac{\omega_m(p)}{M_m(p) - M_{pm}(p)} = \frac{1}{pJ_c} \quad (2.14)$$

$$M_m = c\phi \cdot I_a(p) \quad (2.15)$$

$$F_{c\phi}(p) = \frac{M_m(p)}{I_a(p)} = c\phi \quad (2.16)$$

Vytvořené blokové schéma stejnosměrného motoru:



Obrázek 2.6: Blokové schéma stejnosměrného motoru [6]

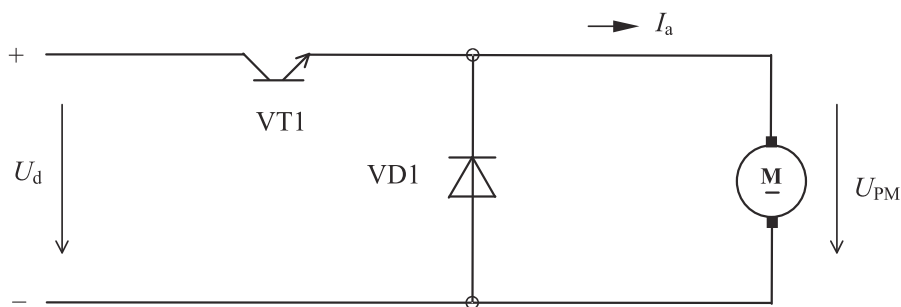
2.3 Matematický model pulzního měniče

Pulzní měniče se používají pro změnu velikosti stejnosměrného napětí, řízení výkonu stejnosměrného zařízení, či otáček stejnosměrných motorů.

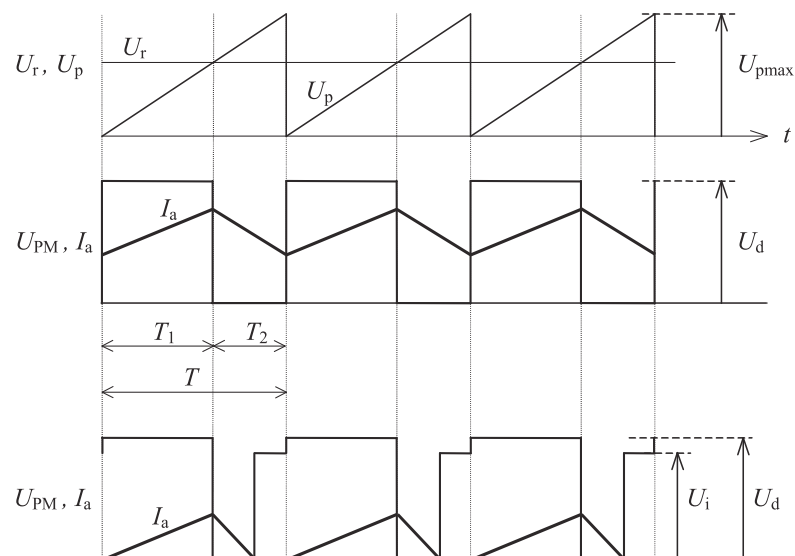
Zjednodušující předpoklady pro modelování měniče:[6]

- Ideální napájecí síť
 - nulová impedance napájecí sítě
- Ideální vlastnosti polovodičových prvků měniče
 - nulová hodnota odporu v sepnutém stavu
 - nekonečná hodnota odporu v rozepnutém stavu
 - okamžité spínání
- výstupní proud je spojitý

Jednokvadrátový pulzní měnič [6]



Obrázek 2.7: Zapojení jednokvadrátového pulzního měniče



Obrázek 2.8: Průběh veličin při PWM řízení pro spojitý a nespojitý proud

Rovnice přenosu:

$$F_{\text{pm}}(p) = \frac{U_s(p)}{U_r(p)} = K_{\text{pm}} \cdot e^{-p\tau_{\text{pm}}} \approx \frac{K_{\text{pm}}}{1 + p\tau_{\text{pm}}} \quad \tau_{\text{pm}} = \frac{T}{2} \quad (2.17)$$

Zesílení pulzního měniče:

$$K_{\text{pm}} = \frac{U_d}{U_{\text{pmax}}} \quad (2.18)$$

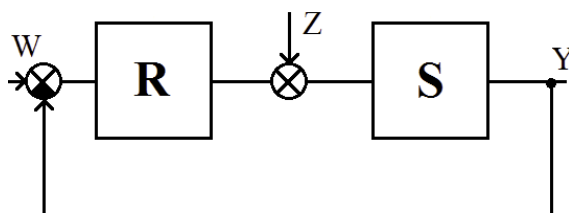
Zesílení je pro spojitý proud konstantní.

Pro zrychlení simulace pohonu byl pulzní měnič nahrazen setrvačným členem s parametry reálného měniče.

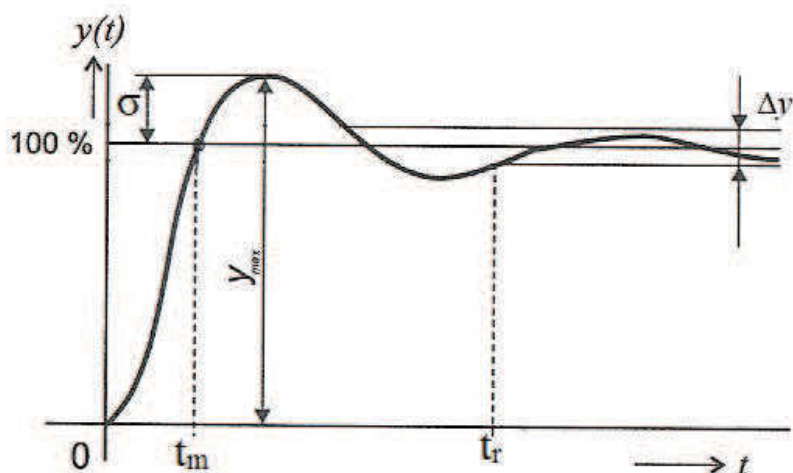
2.4 Regulace pohonu

Kvalita regulace [2]

Kvalita regulace se posuzuje podle přechodové charakteristiky, tedy odezva systému na jednotkový (Heavisideův) skok na vstupu regulátoru.



Obrázek 2.9: Schéma uzavřené regulační smyčky [4]



Obrázek 2.10: Ukazatel kvality regulace [2]

Charakteristické parametry: [4]

- Rychlost regulace t_m – doba dosažení žádané hodnoty
- Překmit σ
- Doba regulace t_r – doba, za kterou regulovaná veličina dosáhne žádané hodnoty v toleranci Δy

Regulační obvod je stabilní tehdy, když se ustálí žádaná veličina na konečné hodnotě. Kromě stability musí regulační obvod zajistit přesnost v ustáleném stavu. Odchylka řídicí a regulované veličiny musí být co nejblíže nule. Všechny přechodné děje musí být dostatečně tlumeny, tím dosáhneme odstranění překmitů v okolí pracovního bodu.

Součet malých časových konstant [4]

Pokud se v regulační struktuře objevuje více malých časových konstant (např. časová konstanta pulsního měniče, filtrační konstanty čidel proudu a otáček, atd.) a vyskytuje-li se v regulační struktuře člen s velkou časovou konstantou (např. mechanická konstanta motoru) je možné nahradit malé konstanty součtovou časovou konstantou τ_σ .

$$\prod_n^i \left(\frac{1}{1 + p\tau_i} \right) \simeq \frac{1}{1 + p \sum_n^i \tau_i} = \frac{1}{1 + p\tau_\sigma} \quad (2.19)$$

2.5 Metody standardních přenosů:

Skutečný přenos uzavřené regulační smyčky F_w neodpovídá ideálnímu, vznikne odvozením z přenosu otevřené smyčky F_o . [4]

$$F_w = \frac{F_o(p)}{1 + F_o(p)} \quad (2.20)$$

$$F_o(p) = F_R(p) \cdot F_{os}(p) \quad (2.21)$$

Návrh regulátoru se provede podílem přenosu otevřené smyčky a přenosu soustavy.

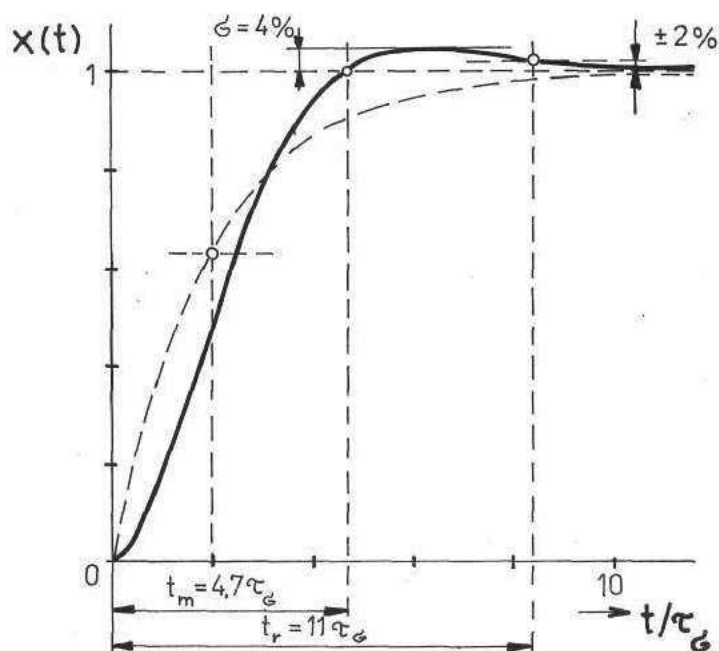
$$F_R(p) = \frac{F_o(p)}{F_{os}(p)} \quad (2.22)$$

Metoda optimálního modulu (OM)

Standardní tvar přenosu otevřené smyčky:[4]

$$F_{om} = \frac{1}{2p \cdot \tau_\sigma \cdot (1 + p\tau_\sigma)} \quad (2.23)$$

Přenos je závislý pouze na součtu malých časových konstant τ_σ .



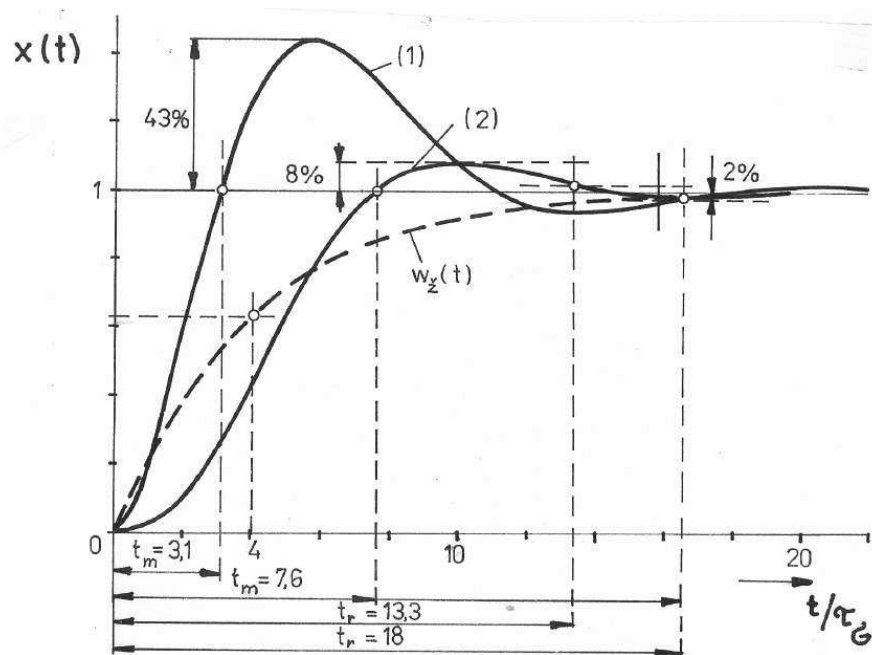
Obrázek 2.11: Přenosová charakteristika metody OM

Metoda symetrického optima (SO)

Standardní tvar přenosu otevřené smyčky:[4]

$$F_{so} = \frac{1 + 4p \cdot \tau_\sigma}{8p^2 \cdot \tau_\sigma^2 \cdot (1 + p\tau_\sigma)} \quad (2.24)$$

Přechodové charakteristiky pro situaci s filtrem nebo bez filtru jsou uvedeny na obr.2.12.



Obrázek 2.12: Přenosová charakteristika metody SO(1), vliv filtru(2)

Tabulka 2.1: Porovnání parametrů jednotlivých metod

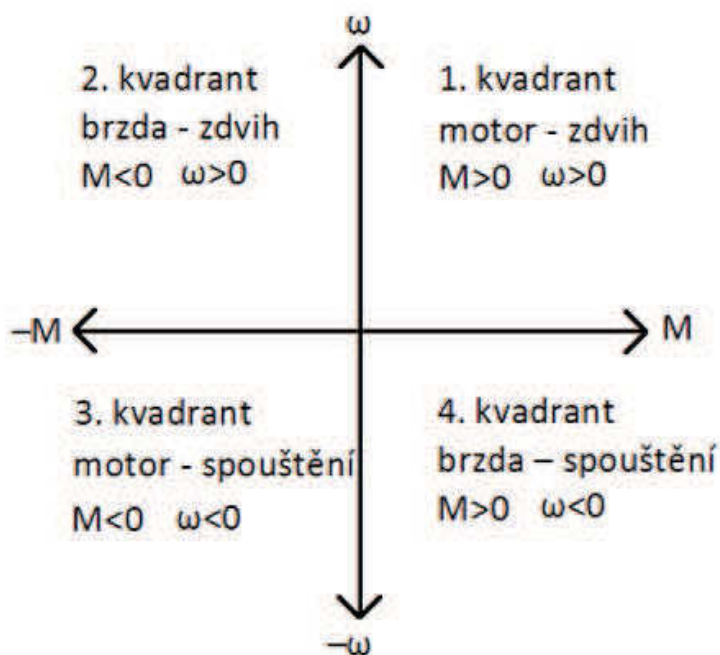
| | σ | t_m | t_r |
|----|----------|------------------|-----------------|
| OM | 4% | $4,7\tau_\sigma$ | $11\tau_\sigma$ |
| SO | 43% | $3,1\tau_\sigma$ | $18\tau_\sigma$ |

Regulátor, vypočtený dle metody OM má pomalejší rychlost regulace t_m a dobu regulace t_r , ale znatelně menší překmit σ . Přenosová charakteristika regulátoru dle metody SO odpovídá netlumeným kmitům a často se doplňuje filtrem, který zmenší překmit, ale i dobu regulace (viz obr. 2.12).

3. Mechanika pohonu

3.1 Mechanické charakteristiky

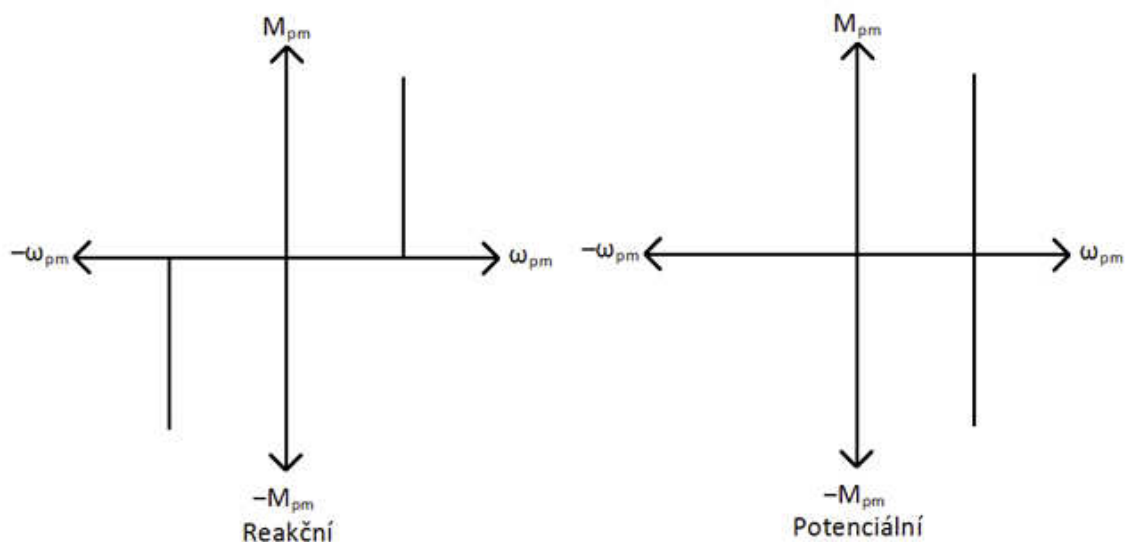
Nejjednodušší příklad mechatronického systému je spojení motoru (elektrického) s pracovním mechanismem. Tyto pohony můžeme rozdělit z hlediska směru otáčení nebo znaménka momentu. Pro zobrazení pracovního bodu pohonu můžeme nakreslit mechanickou charakteristiku ve 4. kvadrantech.[7]



Obrázek 3.1: Mechanická charakteristika [7]

Zatěžovací moment pracovního mechanismu může být:

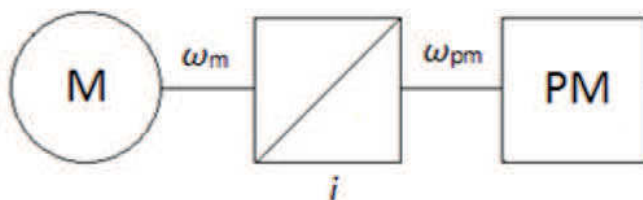
- reakční – působí vždy proti momentu motoru
- potenciální – při jednom směru působí ve směru motoru, při druhém směru působí proti směru motoru (příklad: zvedání plošiny).



Obrázek 3.2: Reakční a potenciální moment pracovního mechanismu [7]

3.2 Převody v elektrických pohonech

Většina pracovních mechanismů pracuje s nižší rychlostí, než je jmenovitá rychlost motoru. Změnu rychlosti lze provést regulací otáček motoru nebo použitím mechanického převodu.[7]



Obrázek 3.3: Elektrický pohon s převodem

U stejnosměrných motorů je nejpoužívanější způsob regulace otáček změnou napájecího napětí. Pouze regulací otáček často není možné získat požadované otáčky za dodržení podmínek bezproblémového chodu pracovního mechanismu. S použitím mechanického převodu dosáhneme snížení (zvýšení) otáček a zároveň zvýšení (snížení) záběrového momentu na výstupní hřídeli převodovky.

3.3 Přepočet parametrů na hřídel motoru

Zařazení mechanického převodu do soustavy pohonu je nutné přepočítat všechny veličiny a parametry na hřídel motoru. Základní pohybová rovnice pro konstantní moment setrvačnosti:[5]

$$M_m - M_{pm} = J_c \frac{d\omega_m}{dt} \quad (3.1)$$

Pro přepočet otáček pracovního mechanismu na otáčky motoru, vyjdeme z rovnice pro převodový poměr:

$$i = \frac{\omega_m}{\omega_{pm}} \quad tedy : \quad \omega_m = i \cdot \omega_{pm} \quad (3.2)$$

Výpočet redukováného momentu pracovního mechanismu:

Vyjdeme z rovnice výkonové rovnováhy:

$$M_{pm} \cdot \omega_{pm} = M_{pm_{red}} \cdot \omega_m \quad M_{pm_{red}} = M_{pm} \cdot \frac{\omega_{pm}}{\omega_m} = M_{pm} \cdot \frac{1}{i} \quad (3.3)$$

Tento vztah platí pouze pro bezztrátový převod. Vztahy se zahrnutím účinnosti jsou rozdílné podle pracovní oblasti stroje.[5]

- Pracovní mechanismus pracuje v motorické oblasti:

$$\eta_p = \frac{P_v}{P_p} = \frac{P_v}{P_v + \Delta P} = \frac{M_{pm} \cdot \omega_{pm}}{M_m \cdot \omega_m} \quad (3.4)$$

$$M_{pm_{red}} = M_{pm} \cdot \frac{1}{i} \cdot \frac{1}{\eta} \quad (3.5)$$

- Pracovní mechanismu pracuje jako brzda:

$$\eta_p = \frac{P_v}{P_p} = \frac{P_v}{P_v + \Delta P} = \frac{M_m \cdot \omega_m}{M_{pm} \cdot \omega_{pm}} \quad (3.6)$$

$$M_{pm_{red}} = M_{pm} \cdot \frac{1}{i} \cdot \eta \quad (3.7)$$

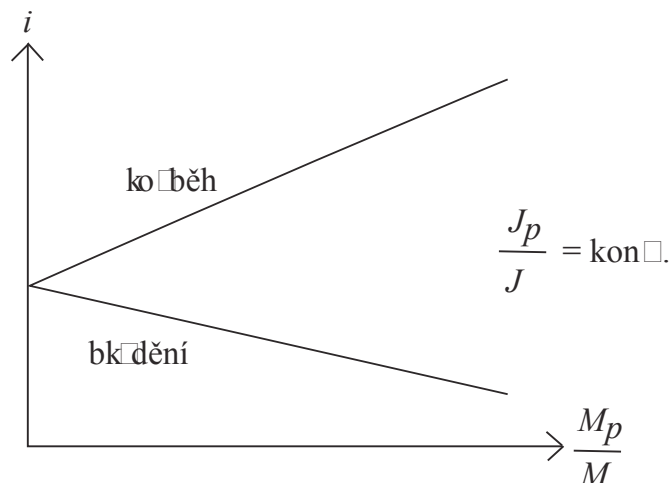
Optimální převod

Charakteristická vlastnost tohoto převodu je největší zrychlení pracovního mechanismu při rozběhu motoru. Určuje se z pohybové rovnice pro rychlost na hřídeli mechanismu.[5]

Výsledný tvar výpočtu převodového poměru:

$$i = \frac{M_{PM}}{M_m} + \sqrt{\left(\frac{M_{PM}}{M_m}\right)^2 + \left(\frac{J_{PM}}{J_m}\right)} \quad (3.8)$$

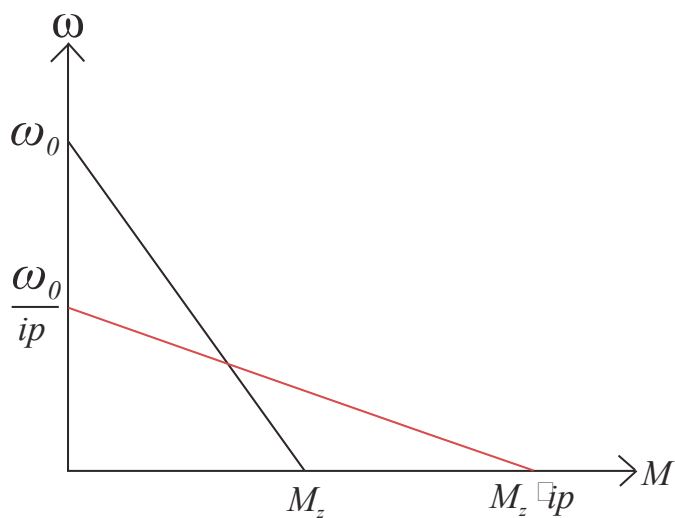
Tento výraz platí i pro brzdění při záporném momentu. Pro $J_p/J = konst.$ dostáváme dvě závislosti $i = f(M_p/M)$ zobrazené na obr. 3.4, jednu pro rozběh, druhou pro brzdění.



Obrázek 3.4: Optimální převod v závislosti na poměrném zatěžovacím momentu [5]

3.4 Vliv převodovky na mechanickou charakteristiku motoru

Mechanický převod používáme, pokud požadujeme menší otáčky pracovního mechanismu než motoru a zároveň vyšší moment pracovního mechanismu.



Obrázek 3.5: Mechanické charakteristiky DC motoru před a za převodovkou [7]

Na obr. 3.5 je zobrazeno snížení otáček pomocí mechanické převodovky s převodovým poměrem $i_p=2$. V tomto případě dojde snížení otáček ω_0 na polovinu a současně ke zvýšení záběrového momentu M_z na dvojnásobek. (za předpokladu zanedbání účinnosti převodovky)[7]

4. Sestavení simulačního modelu DC pohonu

4.1 Zadané parametry

Parametry motoru

Pro simulaci jsem využil DC motor s permanentními magnety typu: MP80S/2

Štítkové parametry motoru:

| | | |
|------------------|-------|-------------|
| Jmenovitý výkon | P_n | 400 W |
| Jmenovité napětí | U_a | 24 V |
| Jmenovitý proud | I_a | 20 A |
| Jmenovité otáčky | n | 2800 ot/min |

Vypočtené (změřené) hodnoty motoru:

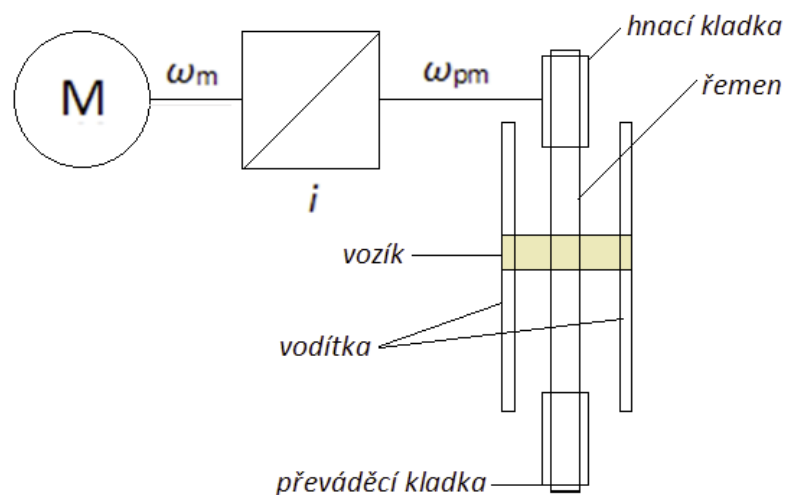
| | | |
|--------------------|---------|---------------------------|
| Odpor kotvy | R_a | 0,115 Ω |
| Indukčnost kotvy | L_a | 0,000306 H |
| $c\phi$ | $c\phi$ | 0,074 Vs |
| Moment setvačnosti | J_m | 0,00125 kg m ² |

Výpočet momentu motoru:

$$M_m = \frac{P_m}{\omega_m} = \frac{400}{\frac{2\pi \cdot 2800}{60}} = 1,36 Nm \quad (4.1)$$

Pracovní mechanismus

Zadaný pracovní mechanismus je zdvižné soustrojí plošiny, skládající se z vozíku, vodítek vozíku, řemene, převáděcí a hnací kladky, viz obr. 4.1.



Obrázek 4.1: Mechanické soustrojí zdvižné plošiny

Parametry pracovního mechanismu

| | | |
|-------------------------------------|----------|-----------|
| Nosnost vozíku | m_z | 30 kg |
| Hmotnost vozíku | m_v | 22,764 kg |
| Poloměr převáděcí kladky | r_k | 0,023 m |
| Tření ve vodítcích vozíku | F_t | 30 N |
| Třecí moment při 1 ‰ přepětí řemenu | M_t | 0,3 Nm |
| Požadovaná rychlost vozíku | v_{pm} | 0,1 m/s |
| Aktuální převodový poměr | i_p | 30 |

4.2 Výpočet parametrů pracovního mechanismu

Moment PM:

Nezatížená plošina:

Zdvih:

$$M_{PM} = [(m_v \cdot g) + F_t] \cdot r + M_t \quad (4.2)$$

Spouštění:

$$M_{PM} = [(m_v \cdot g) - F_t] \cdot r - M_t \quad (4.3)$$

Zatížená plošina:

Zdvih:

$$M_{PM} = [((m_v + m_z) \cdot g) + F_t] \cdot r + M_t \quad (4.4)$$

Spouštění:

$$M_{PM} = [((m_v + m_z) \cdot g) - F_t] \cdot r - M_t \quad (4.5)$$

Určení dynamických momentů

$$J_{PM} = m \cdot r^2 ; \quad J_{PM_{red}} = J_{PM} \cdot \frac{1}{i^2} ; \quad J_c = J_m + J_{PM} \cdot \frac{1}{i^2} \quad (4.6)$$

Tabulka 4.1: Tabulka vypočtených parametrů pracovního mechanismu

| | M _{pm} (Nm) | J _{pm} (kg m ²) | i |
|------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--|
| Spouštění - Nezatížený | 4,146 | 0,012 | 7,383 |
| Zdvih - Nezatížený | 6,126 | 0,012 | 9,950 |
| Spouštění - Zatížený | 10,915 | 0,028 | 17,294 |
| Zdvih - Zatížený | 12,895 | 0,028 | 20,021 |
| | J _c (kg m ²) | M _{pm_red} (Nm) | J _{pm_red} (kg m ²) |
| Spouštění - Nezatížený | 0,001471 | 0,562 | 0,0002209 |
| Zdvih - Nezatížený | 0,001372 | 0,616 | 0,0001216 |
| Spouštění - Zatížený | 0,001343 | 0,631 | 0,0000933 |
| Zdvih - Zatížený | 0,001320 | 0,644 | 0,0000696 |

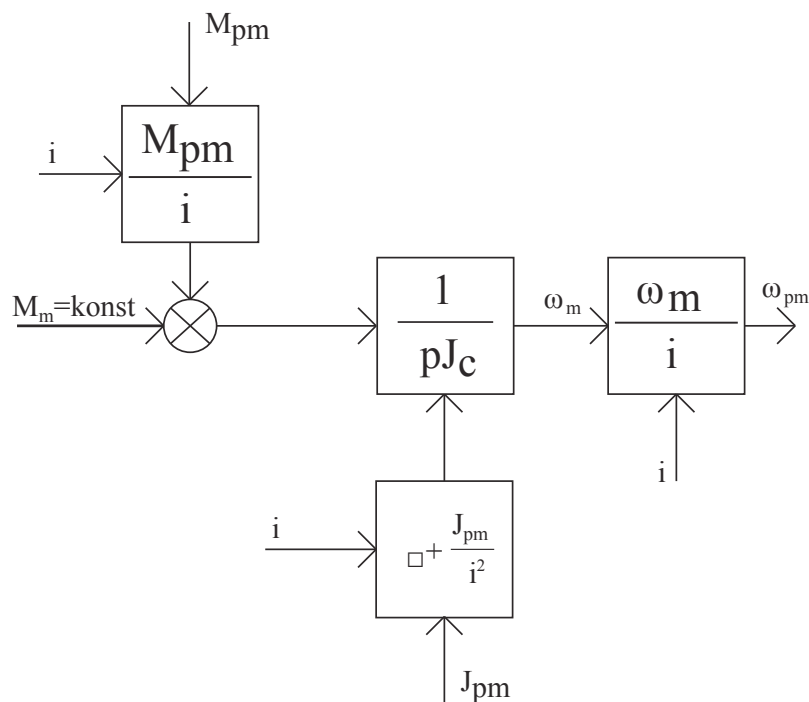
Tabulka 4.1 obsahuje tyto vypočítané parametry pracovního mechanismu: M_{pm} udává moment, potřebný ke zdvihu (spouštění) plošiny. J_{pm} udává celkový moment setrvačnosti pracovního mechanismu. Z těchto hodnot byl pomocí vzorce 3.8 byl vypočítán optimální převodový poměr i . $J_{pm_{red}}$ udává moment setrvačnosti, přepočítaný na hřídel motoru. Veličina $M_{pm_{red}}$ udává moment, potřebný ke zdvihu (spouštění) plošiny, přepočítaný na hřídel motoru vypočítaný dle vztahu 3.7. Veličina J_c udává celkový moment setrvačnosti, tedy součet J_m a $J_{pm_{red}}$.

Tabulka 4.2: Porovnání optimálních, zvolených a fixních převodových poměrů

| | i=optimální | | i=20 | | i=30 | |
|------------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|----------------------------|
| | $M_{pm_{red}}$ (Nm) | J_c (kg m ²) | $M_{pm_{red}}$ (Nm) | J_c (kg m ²) | $M_{pm_{red}}$ (Nm) | J_c (kg m ²) |
| Spouštění - Nezatížený | 0,562 | 0,001471 | 0,207 | 0,001280 | 0,138 | 0,001263 |
| Zdvih - Nezatížený | 0,616 | 0,001372 | 0,306 | 0,001280 | 0,204 | 0,001263 |
| Spouštění - Zatížený | 0,631 | 0,001343 | 0,546 | 0,001320 | 0,364 | 0,001281 |
| Zdvih - Zatížený | 0,644 | 0,001320 | 0,645 | 0,001320 | 0,430 | 0,001281 |

Tabulka 4.2 obsahuje vliv převodových poměrů na moment pracovního mechanismu, přepočítaný na hřídel motoru a celkový moment setrvačnosti. Kvůli praktickému návrhu mechanického převodu, je nutné zvolit jeden převodový poměr, který bude vhodný pro zadaný motor a také všechny režimy pracovního mechanismu. Vyjdeme z výpočtu optimálních převodů, které se charakterizují největším zrychlením pracovního mechanismu. Pro režim zdvih zatížené plošiny vychází největší vypočítaný převodový poměr $i = 20$. Tato hodnota byla zvolena jako nejvhodnější pro zadaný motor a zátěž.

Převodový poměr $i = 30$ je aktuálně použitý pro asynchronní motor IEC63 a zadanou zátěž. Tento motor má jmenovité otáčky $n_n=1280$ ot/min a výkon $P_n=120$ W. Obě tyto hodnoty jsou znatelně nižší, než u stejnosměrného motoru MP80S/2 s otáčkami $n_n=2800$ ot/min a výkonem $P_n=400$ W. Převodový poměr $i = 30$ není vhodný pro použití se stejnosměrným motorem z důvodu, pomalé doby náběhu pracovního mechanismu t_{pm} viz tabulka 5.1.



Obrázek 4.2: Blokové schéma mechanické části DC motoru a pracovního mechanismu

Blokové schéma na obr. 4.2 se skládá z mechanické části motoru, mechanického převodu a pracovního mechanismu. Umožní nasimulovat průběh otáček plošiny v závislosti na čase. Otáčky ω_{pm} jsou přepočítány na rychlost zdvihu plošiny v_{pm} , pomocí poloměru převáděcí kladky. Pro zobrazení výsledků simulace bylo použito omezení maximální rychlosti zdvihu na požadovanou hodnotu.

4.3 Regulace motoru s podřízenou smyčkou s konstantní zátěží

Regulace motoru s podřízenou smyčkou se skládá z regulátoru proudu (podřízený) a z regulátoru otáček (nadřazený).

Tímto uspořádáním je dosaženo: [6]

- výsledkem výpočtu přenosu soustavy vycházejí jednoduché P, PI regulátory
- jednoduché omezení řídicí veličiny (na výstupu regulátoru otáček je obsaženo omezení maximální hodnoty proudu)

$$K_R = \frac{\tau_a}{2 \cdot \tau_\sigma \cdot K_s} \tau_R = \tau_a \quad (4.12)$$

Metoda SO:

$$F_{RI_{om}} = \frac{F_{om}}{F_{os}} = \frac{\tau_a}{2 \cdot \tau_\sigma \cdot K_s} \cdot \frac{1 + 4 \cdot p \tau_\sigma}{4 \cdot p \tau_\sigma} \quad (4.13)$$

$$K_R = \frac{\tau_a}{2 \cdot \tau_\sigma \cdot K_s} \tau_R = 4 \cdot \tau_\sigma \quad (4.14)$$

Výpočet regulátoru rychlosti

$$\tau_p = 2 \cdot (\tau_{pm} + \tau_i) \text{ pro OM}, \tau_p = 4 \cdot (\tau_{pm} + \tau_i) \text{ pro SO} \quad (4.15)$$

$$\tau_\sigma = \tau_p + \tau_{td} \quad (4.16) \quad K_s = \frac{1}{K_i} \cdot \frac{c\varphi}{pJ_c} \cdot K_{td} \quad (4.17)$$

$$F_{os} = \frac{K_s}{p(1 + p\tau_\sigma)} \quad (4.18)$$

Metoda OM:

$$F_{R\omega_{om}} = K_R = \frac{1}{2p \cdot \tau_\sigma \cdot K_s} \quad (4.19)$$

Metoda SO:

$$F_{R\omega_{so}} = \frac{1}{2 \cdot K_s \cdot \tau_\sigma} \cdot \frac{1 + 4p \cdot \tau_\sigma}{4p \cdot \tau_\sigma} \quad (4.20)$$

$$K_R = \frac{1}{2p \cdot \tau_\sigma \cdot K_s} \tau_R = 4 \cdot \tau_\sigma \quad (4.21)$$

Výpočet regulátoru proudu nezávisí na zátěži motoru (pracovního mechanismu), ale pouze na prvcích v soustavě regulovaného pohonu. Viz rovnice č. 4.11. Ve výpočtu regulátoru rychlosti se nachází proměnná J_c , která udává celkový moment setrvačnosti. Tato hodnota závisí na konkrétním zatížení. Vypočítané hodnoty celkového momentu setrvačnosti se nachází v 4.2.

Tabulka 4.3: Porovnání výsledků výpočtu regulátoru rychlosti

| | | | Spouštění - nezatížený | Zdvih - nezatížený | Spouštění - zatížený | Zdvih - zatížený | Průměr |
|----|---------|------------------|---------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------|--------|
| OM | P reg. | K_{r0_om} | 46,23 | 43,11 | 42,22 | 41,47 | 43,26 |
| SO | PI reg. | K_{r0_so} | 43,21 | 40,29 | 39,46 | 38,77 | 40,43 |
| | | τ_{r0} (ms) | 54,35 | | | | |

Tabulka 4.3 obsahuje výsledky výpočtů regulátorů rychlosti dle metody OM a SO pro všechny 4 režimy plošiny. Pro návrh regulátoru byla použita průměrná hodnota zesílení $K_{r\omega}$.

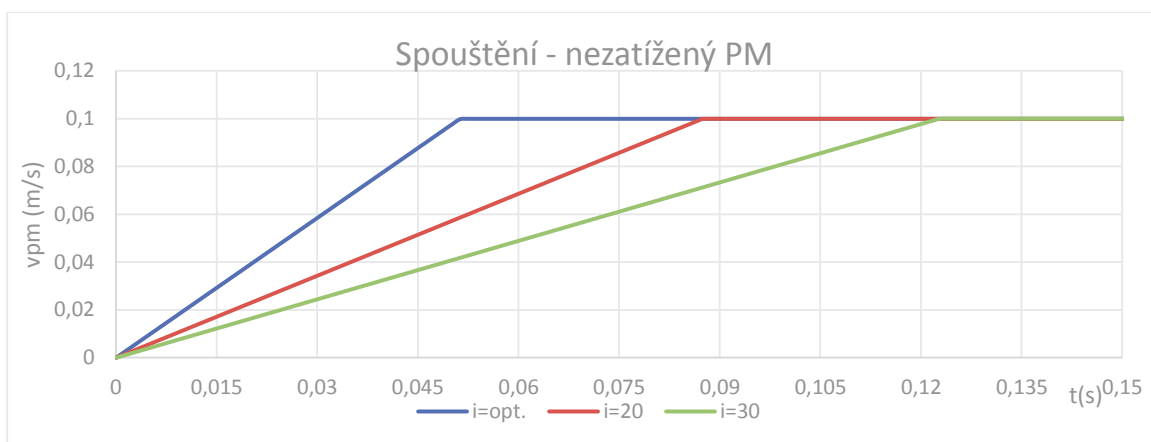
Tabulka 4.4: Celkové výsledky výpočtu regulace

| | | Regulátor proudu | | Regulátor otáček | | |
|----|---------|------------------------------|------|------------------|-----------------------------------|-------|
| OM | PI reg. | K_{ri_om} | 0,34 | P reg. | $K_{r\omega_om}$ | 43,26 |
| | | $\tau_{ri_om} \text{ (ms)}$ | 2,7 | | | |
| SO | PI reg. | K_{ri_so} | 0,34 | PI reg. | $K_{r\omega_so}$ | 40,43 |
| | | $\tau_{ri_so} \text{ (ms)}$ | 0,6 | | $\tau_{r\omega_so} \text{ (ms)}$ | 18,4 |

Tabulka 4.4 obsahuje shrnutí výsledků výpočtu regulátoru rychlosti a proudu pro metody OM a SO. Regulátor proudu vychází v obou případech PI reg. Výpočtem dle metody OM regulátoru rychlosti dostaneme pouze P regulátor, který je charakterizován pouze zesílením. Výpočtem dle metody SO dostaneme regulátor typu PI. Porovnání výsledných průběhů jednotlivých metod najdeme na obr. 5.7 a obr. 5.8.

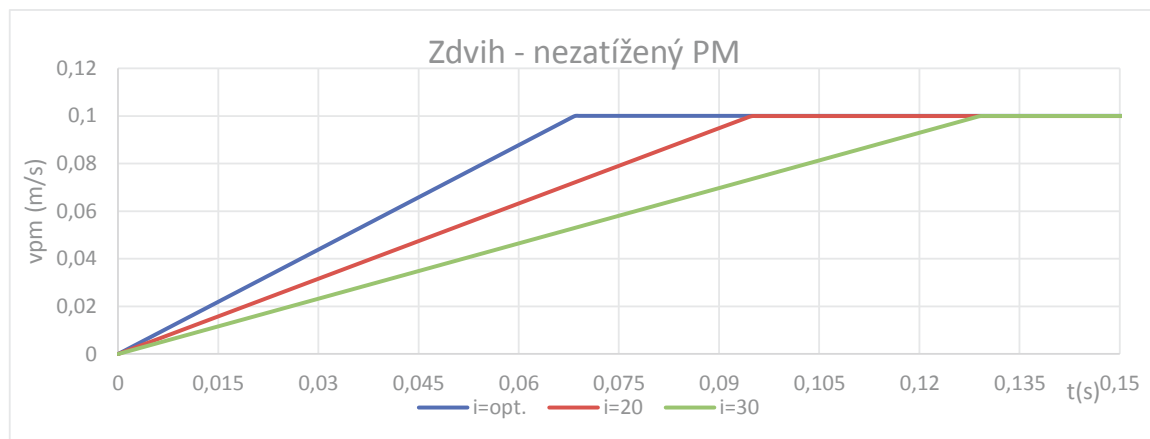
5. Výsledky simulace DC pohonu

5.1 Simulace pracovního mechanismu

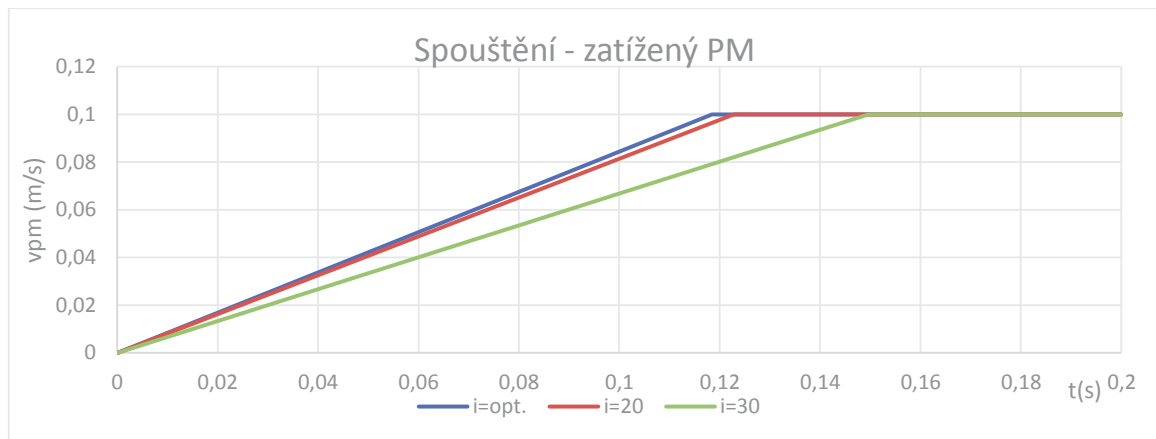


Obrázek 5.1: Simulace převodových poměrů pro spouštění nezatíženého PM

Tato simulace je výsledek blokového schématu na obr. 4.2 pro situaci spouštění nezatíženého pracovního mechanismu. Jedná se o rychlost zdvihu plošiny v závislosti na čase. Tento režim má nejmenší zatížení (viz tabulka 4.2), z toho vyplývá, že rozběh plošiny bude nejkratší.

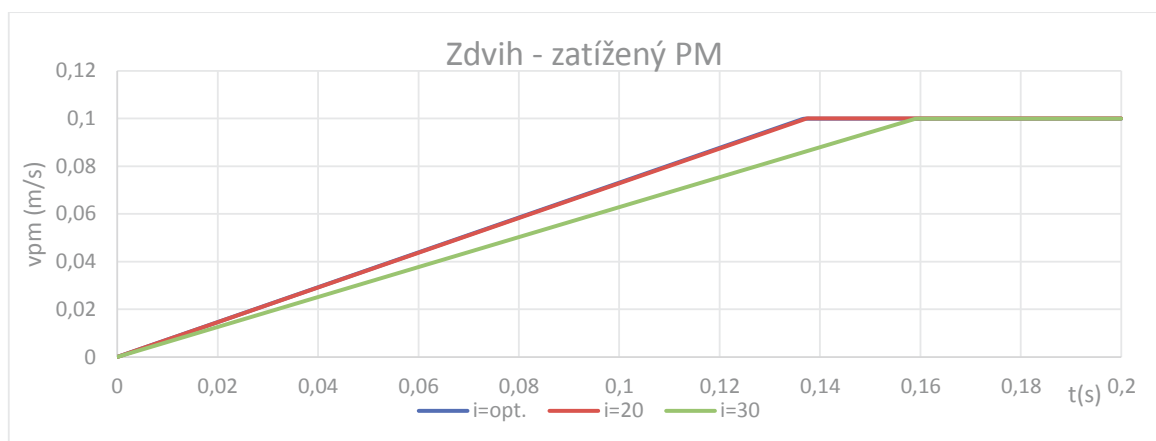


Obrázek 5.2: Simulace převodových poměrů pro zdvih nezatíženého PM



Obrázek 5.3: Simulace převodových poměrů pro spouštění zatíženého PM

Na obr. 5.3 je zobrazena simulace režimu spouštění zatíženého pracovního mechanismu. Optimální převodový poměr se téměř kryje s fixně zvoleným poměrem, tedy i rozběh plošiny bude velmi podobný.



Obrázek 5.4: Simulace převodových poměrů pro zdvih zatíženého PM

Na obr. 5.4 je zobrazena simulace režimu zdvihu zatíženého pracovního mechanismu. Průběh optimálního a zvoleného převodového poměru je shodný. Tento režim je nejvíce zatížen, podle něj byl zvolen pevný poměr $i = 20$. Veškeré porovnání parametrů je zobrazeno formou tabulky 5.1.

Tabulka 5.1: Porovnání doby náběhu a zrychlení PM pro i_{opt} a $i = 20$

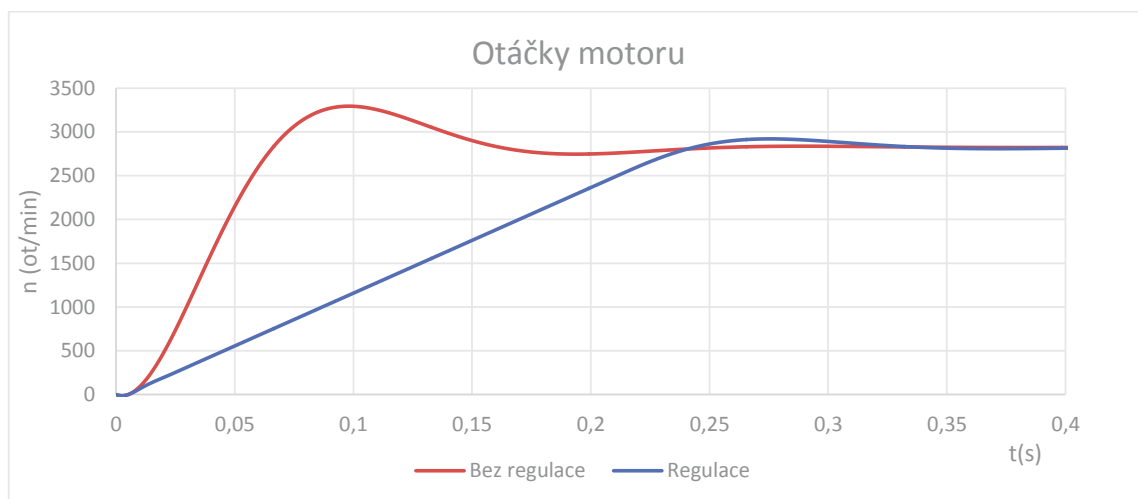
| | i_{opt} | $a_{pm} (m/s^2)$ | $t_{pm} (s)$ | $n_1 (ot/min)$ | $i=20$ | $a_{pm} (m/s^2)$ | $t_{pm} (s)$ | $n_1 (ot/min)$ |
|------------------------------|-----------|------------------|--------------|----------------|--------|------------------|--------------|----------------|
| Spouštění - nezatížený | 7,38 | 3,922 | 0,026 | 306,6 | 20 | 2,257 | 0,044 | 830,4 |
| Zdvih - nezatížený | 9,95 | 3,195 | 0,031 | 413,1 | 20 | 2,165 | 0,046 | 830,4 |
| Spouštění - zatížený | 17,29 | 2,024 | 0,049 | 718,0 | 20 | 1,883 | 0,053 | 830,4 |
| Zdvih - zatížený | 20,02 | 1,795 | 0,056 | 831,2 | 20 | 1,799 | 0,056 | 830,4 |

Tabulka 5.2: Porovnání doby náběhu a zrychlení PM pro převodový poměr $i = 30$

| | $i=30$ | $a_{pm} (m/s^2)$ | $t_{pm} (s)$ | $n_1 (ot/min)$ |
|------------------------------|--------|------------------|--------------|----------------|
| Spouštění - nezatížený | 30 | 1,610 | 0,062 | 1245,6 |
| Zdvih - nezatížený | 30 | 1,570 | 0,064 | 1245,6 |
| Spouštění - zatížený | 30 | 1,451 | 0,069 | 1245,6 |
| Zdvih - zatížený | 30 | 1,410 | 0,071 | 1245,6 |

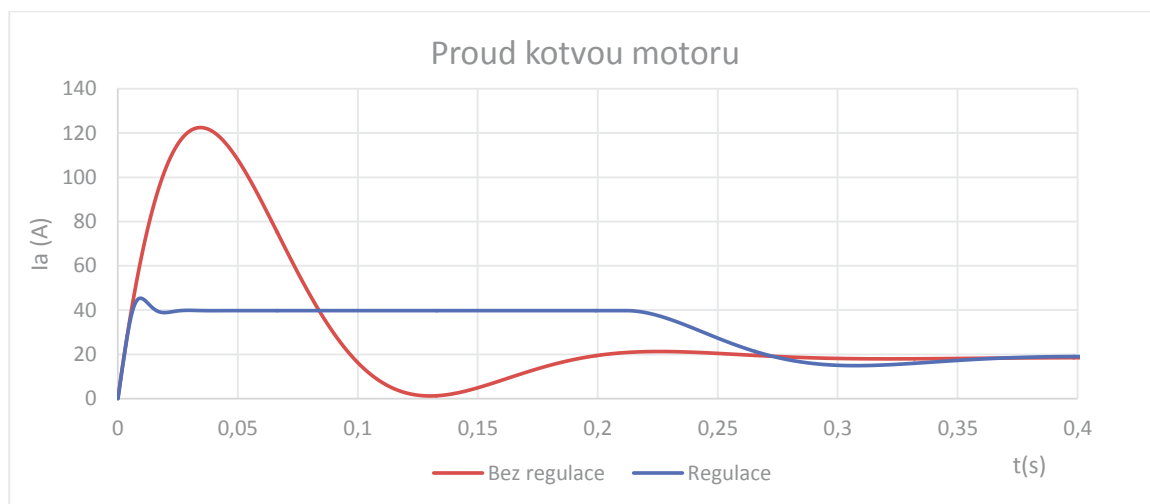
Tabulka 5.1 a 5.2 obsahuje shrnutí výsledků zrychlení pracovního mechanismu a , doby náběhu na požadovanou rychlost t_m a otáčky motoru n_1 .

Simulace regulátoru proudu



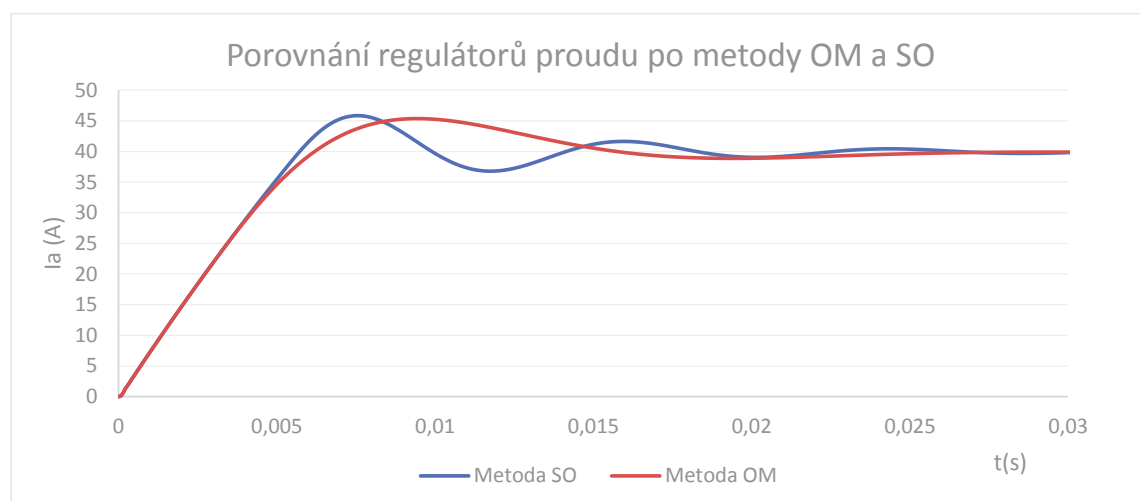
Obrázek 5.5: Simulace průběhů otáček motoru s regulační strukturou/přímo napájený

Na obr. 5.5 jsou zobrazeny průběhy simulace otáček DC motoru pro regulační strukturu (viz obr. 4.3) a struktura bez regulace, kdy bylo na svorky motoru skokově připojeno jmenovité napětí $U_{an}=24$ V. Požadované otáčky byly nastaveny na jmenovitou hodnotu $n_n=2800$ ot/min. U průběhu bez regulace jde vidět rychlejší náběh než u regulátoru, to je způsobeno proudovým omezením.



Obrázek 5.6: Simulace průběhů proudu kotvou motoru s regulační strukturou/přímo napájený

Na obr. 5.6 jsou zobrazeny průběhy simulace průběhu proudu kotvou DC motoru pro regulační strukturu a zapojení bez regulace. V regulátoru otáček bylo nastaveno proudové omezení na dvojnásobek jmenovité hodnoty proudu I_{an} , tedy na 40A. Tato hodnota proudu je bezpečná jak pro motor, tak pro měnič napětí. Vlivem proudového omezení dojde ke snížení doby náběhu otáček na jmenovitou hodnotu a k eliminování překmitu otáček.



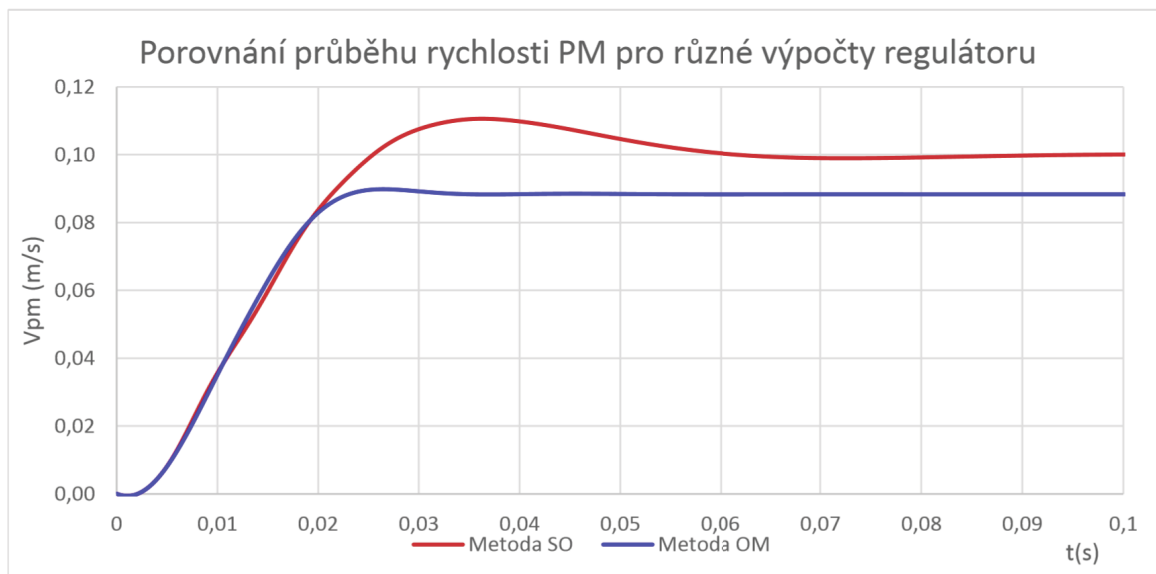
Obrázek 5.7: Porovnání regulátorů proudu vypočítaných dle metody OM a SO

Na obr. 5.7 je zobrazen průběh proudu kotvou motoru pro vypočítaný regulátor dle metody OM a SO. Průběhy se liší v rychlosti regulace t_m a hodnotě překmitu σ . Ustálená

hodnota proudu není konečná, jedná se o hodnotu nastaveného proudového omezení.

Simulace regulátoru rychlosti pracovního mechanismu

Do regulační struktury byl přiřazen pracovní mechanismus.



Obrázek 5.8: Porovnání průběhů rychlosti zdvihu PM pro různé výpočty regulátoru

Na obr. 5.8 jsou zobrazeny průběhy rychlosti spouštění nezátíženého pracovního mechanismu v závislosti na čase. Liší se regulátor rychlosti otáček. Červený průběh je regulátor typu PI, vypočítaný podle metody SO. Regulátor je charakterizován zesílením K_r P regulátoru a časovou konstantou τ_r I regulátoru. Tento regulátor vždy dosáhne požadované (nastavené) rychlosti na vstupu. Tohle tvrzení dokazuje rovnice č. 5.3, kdy je výsledek $\Delta\omega_{so}$ vždy nulový. Modrý průběh odpovídá regulátoru typu P, vypočítaný podle metody OM. Tento regulátor je charakterizovaný pouze zesílením K_r . Odchylka $\Delta\omega_{om}$, tedy rozdíl mezi skutečnou a požadovanou rychlostí se vypočítá podle vztahu č. 5.2. Výsledky odchylky pro jednotlivé režimy jsou uvedeny v tabulce 5.3.

Výpočet odchylky rychlosti zdvihu

$$\Delta\omega_{om} = \lim_{p \rightarrow 0} M_{pm} \cdot F_{z_{om}} = \frac{2 \cdot M_{pm} \cdot \tau_{\sigma} \cdot (1 + p\tau_{\sigma})}{J_c \cdot (1 + 2p\tau_{\sigma} + 2p^2\tau_{\sigma}^2)} \quad (5.1)$$

$$\Delta\omega_{om} = \frac{2 \cdot M_{pm} \cdot \tau_{\sigma}}{J_c} \quad (5.2)$$

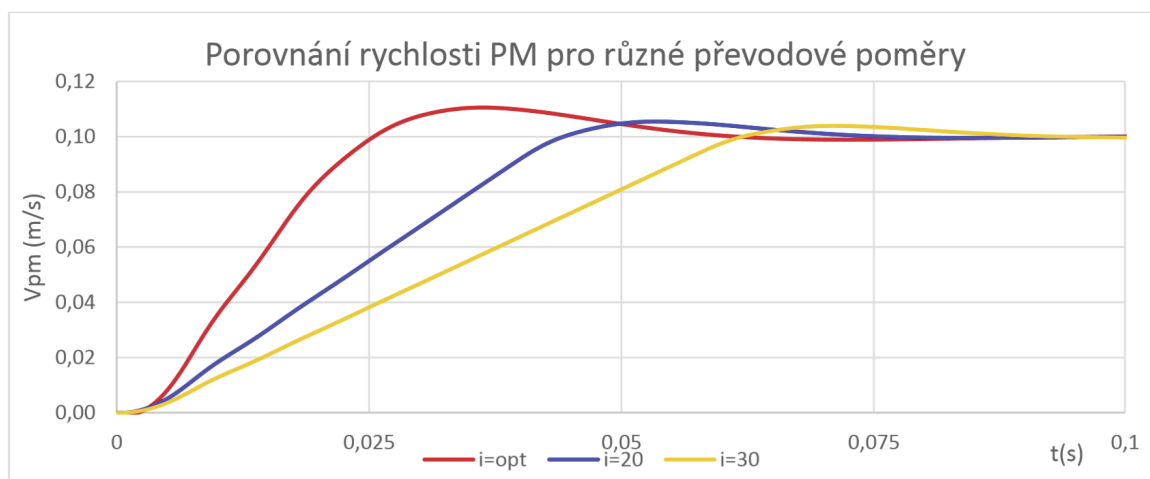
Tabulka 5.3: Tabulka porovnání odchylky rychlosti PM pro metodu OM

| | $\Delta\omega_{om}$ (rad/s) | Δv_{pm_om} (m/s) |
|---------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Spouštění - Nezatížený | 0,115 | 0,0120 |
| Zdvih - Nezatížený | 0,135 | 0,0141 |
| Spouštění - Zatížený | 0,141 | 0,0148 |
| Zdvih - Zatížený | 0,146 | 0,0153 |

Tabulka 5.3 obsahuje porovnání odchylky $\Delta\omega_{om}$ pro jednotlivé pracovní režimy. Je zde také uvedena odchylka Δv_{pm_om} , to je rozdíl mezi skutečnou a požadovanou rychlostí zdvihu pracovního mechanismu.

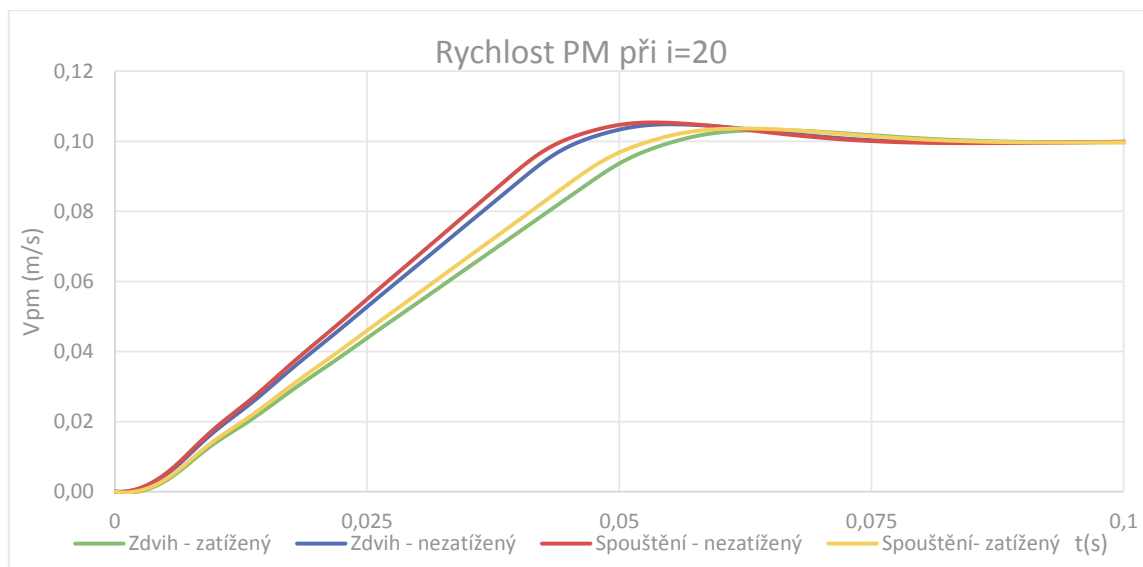
$$\Delta\omega_{so} = \lim_{p \rightarrow 0} M_{pm} \cdot F_{so} = \frac{8p \cdot \tau_{\sigma}^2 \cdot (1 + p\tau_{\sigma}) \cdot M_{pm}}{J_c \cdot (1 + 4p\tau_{\sigma} + 8p^2\tau_{\sigma}^2 + 8p^3\tau_{\sigma}^3)} = 0 \quad (5.3)$$

Následující výsledky simulace platí pro regulátor rychlosti a proudu vypočítaný dle metody SO.



Obrázek 5.9: Porovnání rychlosti spouštění PM pro různé převodové poměry

Na obr. 5.9 jsou zobrazeny průběhy rychlosti spouštění nezatíženého pracovního mechanismu v závislosti na čase pro jednotlivé převodové poměry. V tomto aktuálním režimu je největší rozdíl mezi optimálním převodem ($i = 7,383$) a zvoleným ($i = 20$). To se projeví v rozdílné době náběhu pracovního mechanismu na požadovanou rychlost.



Obrázek 5.10: Porovnání rychlosti zdvihu PM pro zvolený převodový poměr

Na obr. 5.10 jsou zobrazeny průběhy rychlosti zdvihu (spouštění), zatížené (nezatížené) plošiny v závislosti na čase. Každý režim pracovního mechanismu je charakterizován jinou hodnotou momentu setrvačnosti J_c a redukovaného momentu $M_{pm_{red}}$. To způsobí různé doby náběhu t_{pm} a různý překmit σ průběhu rychlosti v_{pm} .

Tabulka 5.4: Tabulka porovnání zrychlení a doby náběhu PM pro regulátory počítané dle metody SO

| | Bez regulátoru | | S regulátorem | | |
|------------------------|---------------------------------|----------------------|---------------------------------|----------------------|-----------------------|
| | $a_{pm} \text{ (m/s}^2\text{)}$ | $t_{pm} \text{ (s)}$ | $a_{pm} \text{ (m/s}^2\text{)}$ | $t_{pm} \text{ (s)}$ | $\sigma \text{ (\%)}$ |
| Spouštění - nezatížený | 1,143 | 0,0875 | 2,257 | 0,044 | 5,41 |
| Zdvih - nezatížený | 1,053 | 0,095 | 2,165 | 0,046 | 4,85 |
| Spouštění - zatížený | 0,813 | 0,123 | 1,883 | 0,053 | 3,63 |
| Zdvih - zatížený | 0,727 | 0,138 | 1,799 | 0,056 | 3,19 |

Tabulka 5.4 obsahuje porovnání zrychlení a_{pm} a dobu náběhu PM t_{pm} mechanické části motoru včetně PM s regulační strukturou DC motoru. Vlivem proudového omezení v regulátoru otáček teče kotvou motoru dvojnásobná hodnota jmenovitého proudu. Ta způsobí zvýšení momentu motoru podle vztahu: 2.2. Tento moment urychlí dobu náběhu t_{pm} viz tabulka 5.4.

6. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo stanovení vlivu převodovky na dynamiku elektrického pohonu. Jedná se o simulace časových průběhů zadaného pracovního mechanismu - zdvih a spouštění plošiny.

V kapitole 2 jsou ve zkratce probrány důležité prvky regulační struktury DC motoru s pulzním měničem. Součástí je také vytvoření matematického modelu DC motoru a pulzního měniče. V kapitole 3 jsou popsány mechanické charakteristiky pracovního mechanismu, seznámení s mechanickým převodem a jeho přepočtem na hřídel motoru. Kapitola 4 obsahuje zadané parametry motoru, pracovního mechanismu a regulátoru. Najdeme zde výpočet parametrů pracovního mechanismu a výpočet regulátorů otáček a proudu. Kapitola 5 obsahuje veškeré výsledky simulace elektrického pohonu s převodem.

Pracovní mechanismus může pracovat ve čtyřech režimech, zdvih, spouštění a pro každý zatížená nebo nezatížená plošina. Pro tyto režimy jsou různé hodnoty momentu pracovního mechanismu M_{pm} a momentu setrvačnosti J_{pm} . Tyto hodnoty společně s konstantními parametry motoru M_m a J_m určují dynamiku pracovního mechanismu. Pro každý režim byl stanoven optimální převodový poměr. Pro praktický návrh pevného mechanického převodu, lze zvolit pouze jednu hodnotu a to největší vypočítanou hodnotu optimálního převodu $i = 20$. Hodnoty doby náběhu a zrychlení pracovního mechanismu, pro srovnání převodů, jsou zpracovány formou tabulky. Pro zjednodušení simulace byly zanedbány ztráty v převodech, které nejsou konstantní, ale závisí na zatížení.

Regulace elektrického motoru byla provedena pomocí principu s podřízenou smyčkou. Obsahuje regulátor rychlosti, který má za úkol dosáhnout požadované rychlosti zdvihu pracovního mechanismu a podřízenou regulaci proudu, která má za úkol omezit maximální proud, tekoucí kotvou stejnosměrného motoru. Jednotlivé regulátory byly vypočítány pomocí dvou metod, metoda optimálního modulu (OM) a metody symetrického optima (SO). Regulátor rychlosti, vypočítaný dle metody OM, není pro pohon vhodný, kvůli nedosažení požadované rychlosti zdvihu plošiny. Nejlepších výsledků dosazují regulátory počítané dle metody SO.

Práce ukázala, že nejvhodnější pevný převodový poměr převodovky je $i = 20$, který je vhodný pro všechny režimy pohybu plošiny a parametry regulátoru proudu a otáček, pro dosažení nejlepšího průběhu rychlosti zdvihu pracovního mechanismu. Návrh regulátoru pomocí metody symetrického optima vykazuje větší rychlost regulace a v případě regulátoru rychlosti dosáhne požadované hodnoty.

Literatura

- [1] Electrical4u. . [online]. Dostupné z: <http://electrical4u.com/permanent-magnet-dc-motor-or-pmdc-motor/>, [cit. 2015-04-07].
- [2] ELUC. . [online]. Dostupné z: <http://eluc.cz/verejne/lekce/957>, [cit. 2015-04-11].
- [3] Stejnoseměrné stroje. . [online]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/hgf/elektrotechnika/sylab_stejnosmerne_stroje_bc.pdf, [cit. 2015-04-16].
- [4] REGULACE EL. POHONŮ. . [online]. Dostupné z: http://www.fei1.vsb.cz/kat430/data/erp1/ERP1-regulace_EP.pdf, [cit. 2015-05-01].
- [5] Čaha, Z.; Černý, M.: *Elektrické pohony: určeno pro stud. fak. elektrotechn.* Knihovnice ČVTS - FEL ČVUT, ČSVTS, 1987.
URL <https://books.google.cz/books?id=eAbNQgAACAAJ>
- [6] Neborák, I.: *Modelování a simulace elektrických regulovaných pohonů.* Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2002, ISBN 9788024800837.
URL <https://books.google.cz/books?id=119YAgAACAAJ>
- [7] Neborák, I.: *Mechatronické systémy pro kombinované a distanční studium.* Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2013.
- [8] Pittermann, M.; univerzita. Elektrotechnická fakulta, Z.: *Elektrické pohony: základy.* Západočeská univerzita, 2008, ISBN 9788070437292.
URL <https://books.google.cz/books?id=0U2EXwAACAAJ>

7. Seznam příloh

K bakalářské práci je přiloženo CD s touto adresářovou strukturou:

- Pracovní mechanismus
 - dokument s výpočtem parametrů pracovního mechanismu
- Regulátory
 - dokument s výpočtem regulátoru rychlosti a proudu
- Matlab-Simulink
 - simulovaná schémata
- PDF
 - pdf soubor bakalářské práce